

DOI: 10.20103/j.stxb.202405241202

王宇,王冬梅,王彦辉,云慧雅,张梦棋,张莹莹.黄土高原退耕刺槐中龄林密度和空间结构对灌草多样性的影响.生态学报,2025,45(2):822-836.
Wang Y, Wang D M, Wang Y H, Yun H Y, Zhang M Q, Zhang Y Y. Effects of density and spatial structure of middle-aged *Robinia pseudoacacia* plantations on the diversity of shrub and grass in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 822-836.

黄土高原退耕刺槐中龄林密度和空间结构对灌草多样性的影响

王 宇¹, 王冬梅^{1,*}, 王彦辉², 云慧雅¹, 张梦棋¹, 张莹莹¹

1 北京林业大学水土保持学院, 教育部林业生态工程研究中心, 北京 100083

2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

摘要: 为了在理解林分密度和空间结构参数对林下灌草多样性的影响基础上科学指导黄土高原退耕还林工程早期栽植的刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 中龄林经营, 于甘肃省泾川县官山林场选择了生长在残塬顶部退耕梯田相似立地上的林龄 18—25 a 的 4 个密度梯度的刺槐中龄人工林, 建立了样地共 12 个, 调查角尺度、混交度、密集度、开敞度和大小比数等林分空间结构参数, 同时调查计算林下灌木、草本层的 Simpson 指数、Gini 多样性指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数及 Patrick 指数等林下植物多样性指标, 运用 Person 相关性分析和灰色关联度分析探究刺槐中龄人工林密度和空间结构参数与林下灌木层和草本层植物多样性的关系, 并确定主要影响因子。结果表明: (1) 林下植物物种总数随林分密度增加呈先增后减的变化, 在密度 1300—1700 株/hm² 时, 林下植物物种总数和草本层多样性指数均达到最大。 (2) 林分密度主要影响刺槐林的透光性、分布格局和混交程度, 密度 < 1300 株/hm² 时林分透光性最好; 密度 1300—1700 株/hm² 时, 57% 的刺槐林木呈随机分布, 此时分布格局最接近天然状态; 密度 > 2100 株/hm² 时, 林分的混交程度最高。 (3) Person 相关性分析表明, 开敞度和灌木层 Simpson 指数、物种丰富度指数呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 混交度和草本层物种丰富度指数、Gini 指数呈显著正相关 ($P < 0.05$)。灰色关联度分析表明, 当林分密度 < 1300、1300—1700、> 1700 株/hm² 时, 影响林下灌草多样性的主要因子分别是混交度、开敞度、胸径大小比数。 (4) 对在研究立地条件下退耕栽植的刺槐中龄林, 可将 1300—1700 株/hm² 作为考虑林下植物多样性的合理经营密度范围。可以基于研究结果, 针对性地优化刺槐人工中龄林的林分密度和空间结构, 促进林下灌草层发育, 提高林下植物多样性和森林的多功能性。

关键词: 黄土高原; 林分空间结构; 林下植被多样性; 林分密度

Effects of density and spatial structure of middle-aged *Robinia pseudoacacia* plantations on the diversity of shrub and grass in the Loess Plateau

WANG Yu¹, WANG Dongmei^{1,*}, WANG Yanhui², YUN Huiya¹, ZHANG Mengqi¹, ZHANG Yingying¹

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Forestry Ecological Engineering Research Center of the Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: In order to scientifically guide the management of middle-aged black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations established in the early stage of the Grain for Green Program on the Loess Plateau, based on the understanding of the effects of stand density and spatial structure parameters on the diversity of understory shrubs and herbs, a study was conducted in the Guanshan Forest Farm, Jingchuan County, Gansu Province. 12 sample plots of middle-aged (18—25 years) black

基金项目: “十四五”国家重点研发项目课题 (2022YFF0801803, 2022YFF0801804); 国家自然科学基金项目 (U20A2085, U21A2005)

收稿日期: 2024-05-24; 网络出版日期: 2024-09-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@bjfu.edu.cn

locust plantations with four density gradients were selected, all growing on similar terraced field on the top of residual plateau. Spatial structure parameters, such as neighborhood pattern, mingling, crowding, openness, and dominance, were investigated, along with the diversity indices of understory shrubs and herbs, including Simpson's index, Gini diversity index, Shannon-Wiener index, Pielou's evenness index, and Patrick's index. Person's correlation analysis and grey relational analysis were employed to explore the relationship between stand density, spatial structure parameters, and the plant diversity of the undergrowth shrub layer and herb layer in middle-aged black locust plantations, and to identify the main influencing factors. The results revealed the followings: (1) The total number of understory plant species firstly increased and then decreased with rising stand density, with the peaks of the total number of understory plant species and the diversity index of the herbaceous layer within the density range of 1300—1700 trees/hm². (2) Stand density mainly affected the light transmittance, distribution pattern, and mixing degree of black locust plantations. When the density was less than 1300 trees/hm², the light transmittance was optimal. Within the density range of 1300—1700 trees/hm², 57% of the black locust trees exhibited a random distribution pattern, closest to a natural state. When the density exceeded 2100 trees/hm², the mixing degree reached its highest level. (3) Person's correlation analysis showed that a very significant positive correlation ($P<0.01$) existed between the openness and the Simpson's index and species richness index of shrub layer; and a significant positive correlation ($P<0.05$) existed between the mixing degree and the species richness index and Gini index of herbaceous layer. The Grey relational analysis indicated that when the stand density was <1300 , 1300—1700, and >1700 trees/hm², the main factors influencing the diversity of understory shrubs and herbs were mixing degree, openness, and DBH (diameter at breast height) dominance, respectively. (4) For middle-aged black locust plantations established on the site conditions studied, a density range of 1300—1700 trees/hm² is recommended as a rational range for managing the understory plant diversity. The findings of this study can be used to optimize the stand density and spatial structure of middle-aged black locust plantations to promote the development of the understory shrub and herb layers for enhancing the understory plant diversity and the multifunctionality of forest.

Key Words: the Loess Plateau; spatial structure of stand; understory shrub diversity; stand density

在我国西北黄土高原,由于干旱少雨、缺少植被和历史上过度垦殖,土壤侵蚀严重^[1]。为了改善恶劣的生态环境,相继实施了一系列水土保持生态工程^[2],尤其是1999年开始的大规模“退耕还林(草)”工程,使黄土高原植被覆盖率大幅提升^[1]。然而,由于造林和营林密度过大,导致了生态耗水超过土壤水分承载力和土壤干层严重^[3]、林下植物数量减少和多样性降低等一系列问题^[4]。黄土高原现存人工林面积最大的是刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林,由于长期纯林经营,层次结构简单,林分密度和空间结构不合理,往往仅有少量伴生树种或几近纯林,林层单一,且因干旱胁迫而生长差,尤其过密林分的遮荫使林下灌草发育不好,植物多样性降低。退耕还林工程早期栽植的刺槐人工林目前已进入中龄林阶段,上述问题都已出现,亟需在理解刺槐林密度和空间结构特征及其对林下植物多样性影响的基础上合理调控林分结构。

以往研究表明,在林分密度、空间结构、林下植物多样性之间存在着密切联系,不同密度林分的空间结构和林下植物物种多样性都差异较大。林分密度可通过改变林分空间结构、光的通透率、土壤理化性质等直接或间接影响林下植物多样性^[5];相比林分非空间结构因子(密度、林龄、郁闭度等)^[6-8],林分空间结构因子(大小比数、角尺度、混交度、开敞度等)可描述林木水平空间排列、树种相互隔离、不同大小林木竞争状况,即描述目标木和相邻木的空间关系,也会显著影响林下植物多样性,且在森林经营中相对容易调控^[9]。在以往影响林下灌草多样性因子的研究中,多集中于环境因子(土壤、海拔、坡位、坡度等)^[10-12]或林分非空间结构因子,较少探索林分空间结构因子的影响,且多集中在混交林^[13]或不同演替阶段、疏伐程度、干扰程度、空间尺度^[14-17]等条件下的林分空间结构参数变化,而对不同密度林分的空间结构和灌草多样性关系的研究不足。

因此,在具有黄土高原刺槐人工林典型性的甘肃省泾川县官山林场,设立不同密度的刺槐人工中龄林样地,以密度为变量因子,采用相邻木法研究不同密度刺槐林的林分结构特征对林下灌草的影响,揭示不同密度刺槐人工林的空间结构和灌草多样性的相关关系,为黄土高原退耕还林工程早期栽植的刺槐中龄林结构调整提供科学指导。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省平凉市泾川县(107°15′—107°45′E,35°11′—35°31′N)官山林场(图1),这里地处黄土高原中部的陕甘两省交界处,地貌属典型黄土高原沟壑区,海拔变化在1005—1351 m。属温带半湿润性气候,年均气温10.3℃,年极端最高气温40.0℃,年极端最低气温-24℃,无霜期189 d;年均降水量522.6 mm,约70%集中在7—9月。林场主要为刺槐人工纯林,但在长期经营中林下栽植了油松(*Pinus tabulaeformis*)、云杉(*Picea asperata*)等乔木树种,还有自然更新出现的君迁子(*Diospyros lotus*)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)等乔木树种和杠柳(*Periploca sepium*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)等灌木;林下草本主要有马唐(*Digitaria sanguinalis*)、葎草(*Humulus scandens*)等。

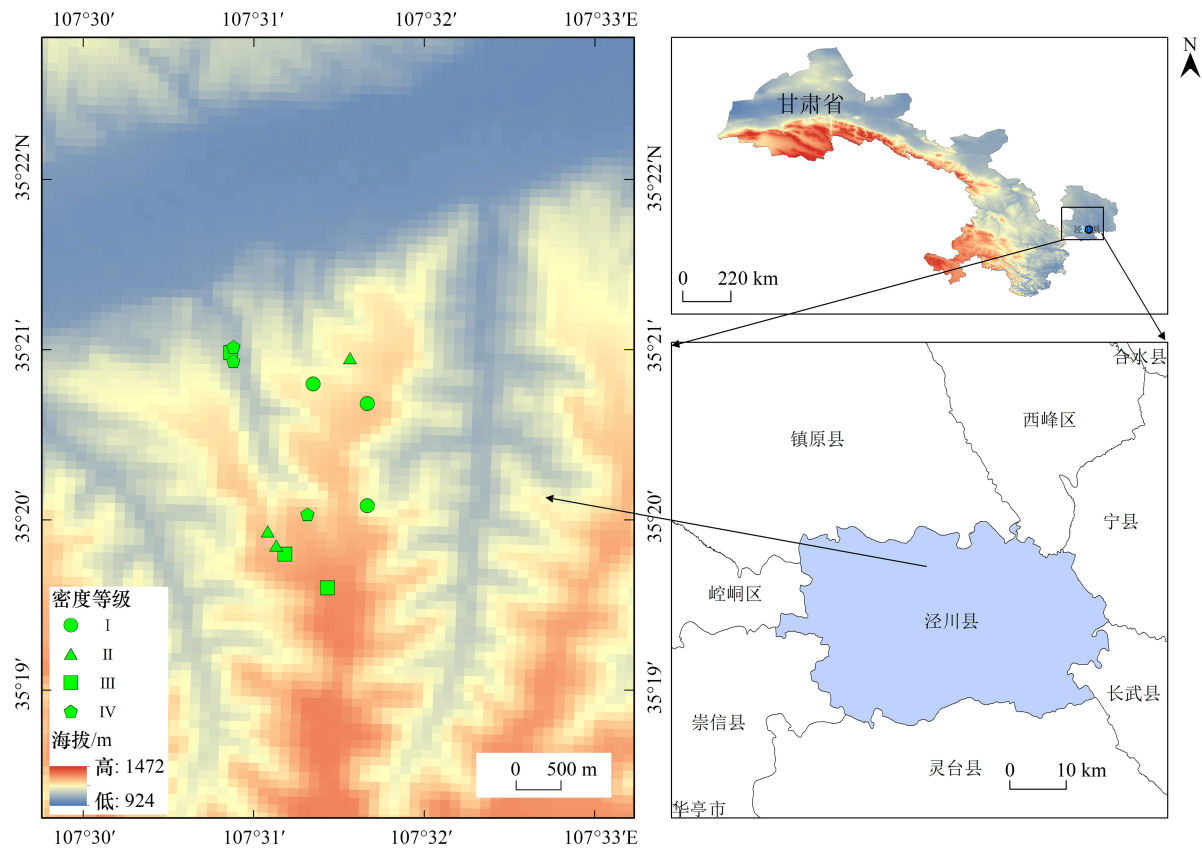


图1 研究区和不同密度样地的位置

Fig.1 Location of study area and different density plots

图例中罗马数字代表样地的林分密度等级分别为: I :<1300 株/hm²; II :1300—1700 株/hm²; III :1700—2100 株/hm²; IV :>2100 株/hm²

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2023 年 7—8 月,在官山林场和周边区域的残塬塬面上,选取退耕还林工程早期在退耕梯田上栽植的刺槐人工林样地,按 4 个林分密度等级(I :<1300 株/hm²; II :1300—1700 株/hm²; III :1700—2100 株/hm²; IV :>2100 株/hm²)各设 3 个 20 m×20 m 的重复样地(图1,表1),合计 12 个样地,其林龄相近(18—25 a),林冠郁闭度多在 0.6—0.8 之间,便于比较林分密度和林分结构特征对林下植物多样性的影响。为了充分体现各样地的特征,各样地间距均>200 m,且离林缘 20 m 以上。选择的 12 个样地均为梯田退耕后造林,立地条件基本一致(表1),并在造林初期进行了带状整地,造林设计的初植密度为 5000 株/hm²,所用刺槐苗均为地径≥0.5 cm 的两年生刺槐幼苗。为进行原有刺槐退化林的改造,在 2015 年对研究区人工林进行了方式一致的间伐,

表 1 刺槐人工林乔木层概况

样地分组 Plot group	样地号 Plot No.	林龄/a Stand age	树种组成 Tree species composition	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	平均冠幅 Average crown width/m	林分密度 Stand density/(株/hm ²)	林分蓄积 Stand stock/(m ³ /hm ²)	坡向 Slope aspect	坡面坡度 Slope degree/(°)	梯田宽度 Terrace width/m	海拔/m Altitude	林冠郁闭度 Canopy density
A	1	20	10 刺-君	14.70	12.37	3.87	1056	3.3	半阴	15	30	1207	0.63
	2	18	10 刺-君	16.68	12.31	4.08	1114	5.6	半阴	15	30	1207	0.63
	3	18	10 刺	13.10	10.06	3.91	1200	2.7	阴	0	25	1272	0.74
	平均	19		14.90	11.6	3.95	1123	3.9				1229	0.67
	4	22	10 刺-臭	12.93	9.91	4.32	1475	2	阴	0	25	1280	0.72
B	5	21	8 刺-2 君+臭-花-山	10.51	8.63	3.91	1500	4	半阴	10	25	1200	0.70
	6	22	8 刺-2 君	10.79	10.63	3.58	1500	2.2	阴	7	25	1287	0.68
	平均	22		11.50	9.7	3.95	1492	2.7				1256	0.70
	7	25	10 刺	14.12	4.89	3.53	1775	2.6	阴	3	30	1232	0.82
	8	22	9 刺-1 君+桑-臭-油	9.72	7.82	3.04	1975	2.9	阴	3	30	1323	0.76
C	9	18	10 刺+君	11.59	7.41	2.07	2000	2.5	阴	7	25	1157	0.64
	平均	22		11.90	6.70	2.92	1917	2.7				1237	0.74
	10	18	10 刺+君	10.77	7.96	2.24	2129	3.4	阴	7	25	1146	0.58
	11	21	9 刺-1 君+臭	7.58	7.48	1.94	2446	2.2	阴	7	30	1273	0.65
	12	25	8 刺-2 君	9.10	7.60	2.14	2615	2.6	阴	7	25	1160	0.82
	平均	21		9.20	7.70	2.11	2397	2.7				1193	0.68

①A、B、C、D 分别表示林分密度为<1300 株/hm²、1300—1700 株/hm²、1700—2100 株/hm²、>2100 株/hm²的样地分组;②以各树种的胸高断面面积占林分总胸高断面面积的比值表示树种组成系数,如刺槐占比 90%—100%写成 10 刺,如君迁子占比 10%—20%写成 2 君,当混有的其它树种占比 2%—5%时表示为“+”,占比在 2%以下表示为“-”;③刺:刺槐;君:君迁子;臭:臭椿;花:花椒;山:山楂(*Crataegus pinnatifida*);油:油松;④平均冠幅为冠幅直径

2016 年在林下按 540 株/hm² 的统一规格栽植了油松和云杉 2 种常绿针叶树幼苗, 现保存密度为 66 株/hm²。

调查记录各样地的经纬度、海拔等立地特征以及林冠郁闭度等基本信息, 分乔木层(高度 ≥ 3 m)、灌木层(0.5 m ≤ 高度 < 3 m)、草本层(高度 < 0.5 m) 进行植被地上调查, 对胸径 ≥ 5 cm 的乔木每木检尺, 调查记录树种、胸径、树高、冠幅、相对坐标等; 在样地四角和中心设 5 块 5 m × 5 m 的灌木样方, 调查灌木的种类、地径、高度、冠幅、株数、覆盖度等; 在各灌木样方中心设置 1 个 1 m × 1 m 的草本样方, 调查草本的种类、数量、高度、盖度等。在划分乔木层、灌木层、草本层层时, 将不同高度的乔木和灌木幼苗划入其实际所处植被层, 如乔木幼树高度在 0.5—3 m 时归入灌木层, 乔木和灌木等木本植物幼苗高度 < 0.5 m 时归入草本层^[18]。

2.2 数据分析与处理

2.2.1 确定空间结构单元及消除边缘效应

用于分析林分空间结构特征的林分空间结构单元, 由目标木与相邻最近的四株林木组成^[19]。为减少林地边缘影响, 所有涉及空间结构的计算, 只分析样地核心区域内的林木, 缓冲区的林木只作为相邻木参与计算, 不作为中心木。样地缓冲区为各边长两侧的 5% (图 2)。

2.2.2 空间结构参数及计算方法

在样地内均匀随机选取 20 株目标树及其相邻最近的 4 株树构成空间结构单元, 根据目标树与四株相邻木的关系计算如下林分水平空间结构参数:

(1) 角尺度(W), 反映林木水平分布的均匀性^[20]:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (1)$$

式中, 当第 j 个目标树与相邻树的夹角 α 小于标准角 α_0 (72°) 时 $z_{ij} = 1$, 否则 $z_{ij} = 0$ 。 n 为相邻木数量, 本研究取 $n = 4$ 。在这种情况下, 根据 W 的值将均匀度分为五级: $W = 0$, 很均匀; $W = 0.25$, 均匀; $W = 0.5$, 随机; $W = 0.75$, 不均匀; $W = 1$, 很不均匀。

(2) 混交度(M), 反映树种间的隔离程度^[20]:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (2)$$

式中, n 为相邻木数量, v_{ij} 为对象木 i 与第 j 株相邻木的同种度, 非同种时 $v_{ij} = 1$, 否则 $v_{ij} = 0$ 。 M 值越大混交度越强, 根据 M 值将混交度分为五级: 零度 ($M = 0$)、弱度 ($M = 0.25$)、中度 ($M = 0.5$)、强度 ($M = 0.75$)、极强度 ($M = 1$)。

(3) 大小比数(U), 反映林分中林木分化程度大小^[21]:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (3)$$

式中, 当目标树 i 的胸径(树高) 小于相邻木 j 的胸径(树高) 时 $k_{ij} = 1$, 否则 $k_{ij} = 0$ 。将基于胸径(树高) 的大小比数记作 U_1 (U_2)。对某株林木而言, 大小比数越小, 来自相邻木的竞争压力越小, 表明胸径和树高分布越均匀, 该树木在竞争中越处于有利地位。

(4) 开敞度(K), 反映目标树受相邻木遮蔽的程度, 可描绘林下光照条件^[13]:

$$K_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{D_{ij}}{H_{ij}} \right) \quad (4)$$

式中, H_{ij} 为目标树 i 的相邻木 j 的树高之差; D_{ij} 为目标树 i 与相邻木 j 间的距离。将 K_i 的取值划分为 (0, 0.2]、(0.2, 0.3]、(0.3, 0.4]、(0.4, 0.5]、(0.5, +∞], 表示该林分透光条件严重不足、不足、基本充足、充足、很充足的状况。

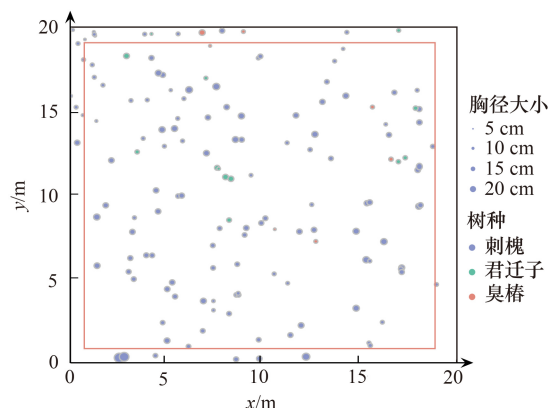


图 2 树木位置示意图

Fig.2 Location diagram of trees

该图为 11 号样地, 红线和黑线之间为缓冲区, 实心圆大小表示胸径, 不同颜色代表不同树种

(5) 密集度(C),反映林木冠层的密集程度^[21]:

$$C_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y_{ij} \quad (5)$$

式中,当目标树 i 与相邻木 j 的树冠投影重叠时 $y_{ij}=1$,否则 $y_{ij}=0$ 。密集度包含5种值与状态:0表示很稀疏,0.25表示稀疏,0.5表示中等密集,0.75表示较密集,1表示很密集,C值越大树冠连接越密,树冠相互重叠挤压的程度也越高。

2.2.3 物种多样性指数计算

采用物种相对多度(RA)、相对高度(RH)、相对盖度(RC)计算物种的重要值 P_i ,进而计算林下灌草的 Simpson 指数(D)、Gini 多样性指数(D_1)、Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(J_{sw})及 Patrick 指数(S')^[20]:

$$P_i = (RA + RH + RC)/3 \quad (6)$$

$$D_1 = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (7)$$

$$D = 1 - \sum \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (8)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (9)$$

$$J_{sw} = H' / \ln S \quad (10)$$

$$S' = S \quad (11)$$

式中, N 是所有物种的个体总数, N_i 表示第 i 个物种的个体数, S 是物种的数目(种数)。

2.2.4 数据处理

采用 Excel 2021 整理实验数据,SPSS 20.0 分析处理数据,Origin 2020 作图。分析不同密度刺槐林结构参数一元分布状况,对不同密度和林龄的刺槐林分结构参数、林下植被状况进行 Person 相关分析和灰色关联度分析。

3 结果与分析

3.1 不同密度刺槐林下的灌草种类组成和重要值

研究地区共记录维管植物 58 种,包括乔木 6 科 6 属 6 种、灌木 9 科 8 属 9 种、草本 26 科 39 属 43 种。种数最多的为菊科植物 9 种、蔷薇科 5 种,分别占物种总数的 15.5%、8.62%。在密度范围为 I(<1300 株/hm²)、II(1300—1700 株/hm²)、III(1700—2100 株/hm²)、IV(>2100 株/hm²)的样地,分别共有林下灌草植物 23 科 33 属 33 种、33 科 38 属 40 种、23 科 28 属 28 种、28 科 34 属 35 种。

按植物对光的耐受性将调查到的维管植物划分为阳生、耐阴、阴生植物^[22]。其中,乔木树种包括阳生植物 2 种、阴生植物 2 种、耐阴植物 2 种;灌木包括阳生植物 6 种、阴生植物 2 种;草本植物包括阳生植物 11 种、阴生植物 11 种、耐阴植物 22 种。随着林分密度增加,林下灌木和草本种类数量及其总数均基本上呈先增后减的变化趋势(图 3)。

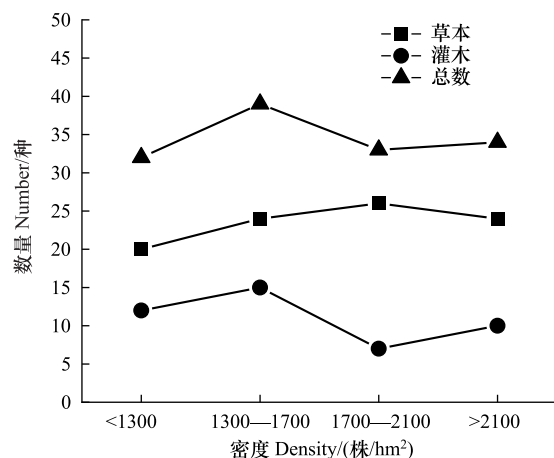


图 3 不同密度刺槐林的林下灌草种类数量

Fig.3 Number of understory shrub species in different densities of *Robinia pseudoacacia* forests

对林下植物整体而言,各密度林分的林下灌、草多样性指数均无显著差异(表2),但密度为1300—1700株/hm²时具有草本层多样性指数、灌木层 Gini 指数、Simpson 指数的最大值,灌木层的 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数及 Patrick 指数的最大值发生在密度<1300 株/hm²的样地。

表 2 不同密度刺槐林的林下灌草多样性指数

Table 2 Understory shrub diversity index of *Robinia pseudoacacia* forests with different densities

层次 Level	多样性指数 Diversity index	林分密度 Stand density/(株/hm ²)			
		<1300(I)	1300—1700(II)	1700—2100(III)	>2100(IV)
草本层 Field layer	Gini	0.527a	0.605a	0.586a	0.586a
	Simpson	0.536a	0.646a	0.486a	0.606a
	Shannon-Wiener	1.156a	1.145a	0.965a	1.190a
	Pielou	0.561a	0.699a	0.624a	0.710a
	Patrick	5.7a	5.8a	4.9a	5.6a
灌木层 Shrub layer	Gini	5.667a	0.620a	0.318a	0.428a
	Simpson	0.770a	0.809a	0.611a	0.455a
	Shannon-Wiener	1.682a	0.983a	0.634a	0.829a
	Pielou	0.725a	0.712a	0.475a	0.527a
	Patrick	9.3a	5.0a	2.6a	4.0a

各列均为小写字母 a,表示不同密度刺槐林分之间的数据差异不显著(P<0.05)

如表3,从两种角度分析不同密度刺槐林的林下植物重要值变化。一是在不分植被层的情况下,林下灌木和草本物种的种类和重要值随密度变化而改变,在低密度林分(<1300 株/hm²)中,草本物种马唐占主导地位;当林分密度>1300 株/hm²时,木本物种如茅莓、臭椿等的重要值排序提前并在林下植物层占据优势。二是基于植株高度将林下植物划分到灌木层或草本层,在灌木层中的君迁子等物种的重要值排序呈随林分密度增加而提前的趋势,其在灌木层中的生态位优势和竞争力随密度增加而增强;当林分密度>1300 株/hm²时,作为生长在草本层的木本植物的茅莓的重要值排序一直第一,占据绝对优势。

表 3 不同密度刺槐林物种组成及重要值前五名排序

Table 3 Composition and ranking of species with top five important values in *Robinia pseudoacacia* forests with different densities

林分类型 Stand type	物种 Species	重要值/% Importance value	物种 Species	重要值/% Importance value	物种 Species	重要值/% Importance value	物种 Species	重要值/% Importance value
林下植物 Understory plants	马唐	22.59	茅莓	33.26	君迁子	31.14	茅莓	24.22
	刺槐	11.08	臭椿	21.07	花椒	18.65	马唐	18.77
	油松	9.09	马唐	9.43	刺槐	13.04	君迁子	16.42
	臭椿	7.21	铁线莲	8.44	茅莓	9.87	毛榛	16.34
	君迁子	6.44	忍冬	6.36	知母	8.80	花椒	10.42
草本层 Field layer	马唐	37.64	茅莓	33.26	茅莓	19.74	茅莓	26.47
	茅莓	13.01	马唐	18.86	知母	17.60	马唐	25.95
	菵草	7.16	铁线莲	16.84	马唐	12.90	灰绿藜	8.25
	野艾蒿	6.39	菵草	5.67	大丁草	9.15	菵草	6.00
	紫菀	6.13	羊胡子草	3.60	等齿委陵菜	8.98	等齿委陵菜	5.33
灌木层 Shrub layer	刺槐	22.15	臭椿	21.08	君迁子	20.76	君迁子	22.46
	油松	18.18	忍冬	12.72	花椒	12.43	臭椿	6.37
	臭椿	14.19	花椒	12.01	刺槐	8.69	刺槐	6.37
	君迁子	13.88	山楂	11.70	云杉	5.22	冻绿	2.83
	花椒	13.63	君迁子	11.58	臭椿	9.26	杠柳	2.00

野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia*; 紫菀 *Aster tataricus*; 铁线莲 *Clematis florida*; 羊胡子草 *Eriophorum scheuchzeri*; 知母 *Anemarrhena asphodeloides*; 大丁草 *Gerbera anandria*; 等齿委陵菜 *Potentilla simulatrix*; 灰绿藜 *Chenopodium glaucum*; 忍冬 *Lonicera japonica*; 冻绿 *Rhamnus utilis*; 毛榛 *Swida walteri*

3.2 不同密度刺槐林的空间结构参数

图 4 分析了各密度刺槐林的空间结构参数分布频率。可看出,角尺度近似服从正态分布。所调查样地的林木约 20%呈均匀分布、50%呈随机分布、30%呈团状分布^[17]。林分密度<1700 株/hm²时,均匀分布的刺槐株数占比最高;在 1700—2100 株/hm²时,57%的林木呈随机分布;在>2100 株/hm²时,团状分布林木株数占比最高。 W 取值 0.5 的结构单元最多,其中超过 50%的目标树与周围 4 株相邻木树冠连接。在各密度刺槐林样地中, W 值为不均匀和很不均匀的比例较高,均近 30%,表明刺槐部分个体处于聚集状态,竞争压力较大。

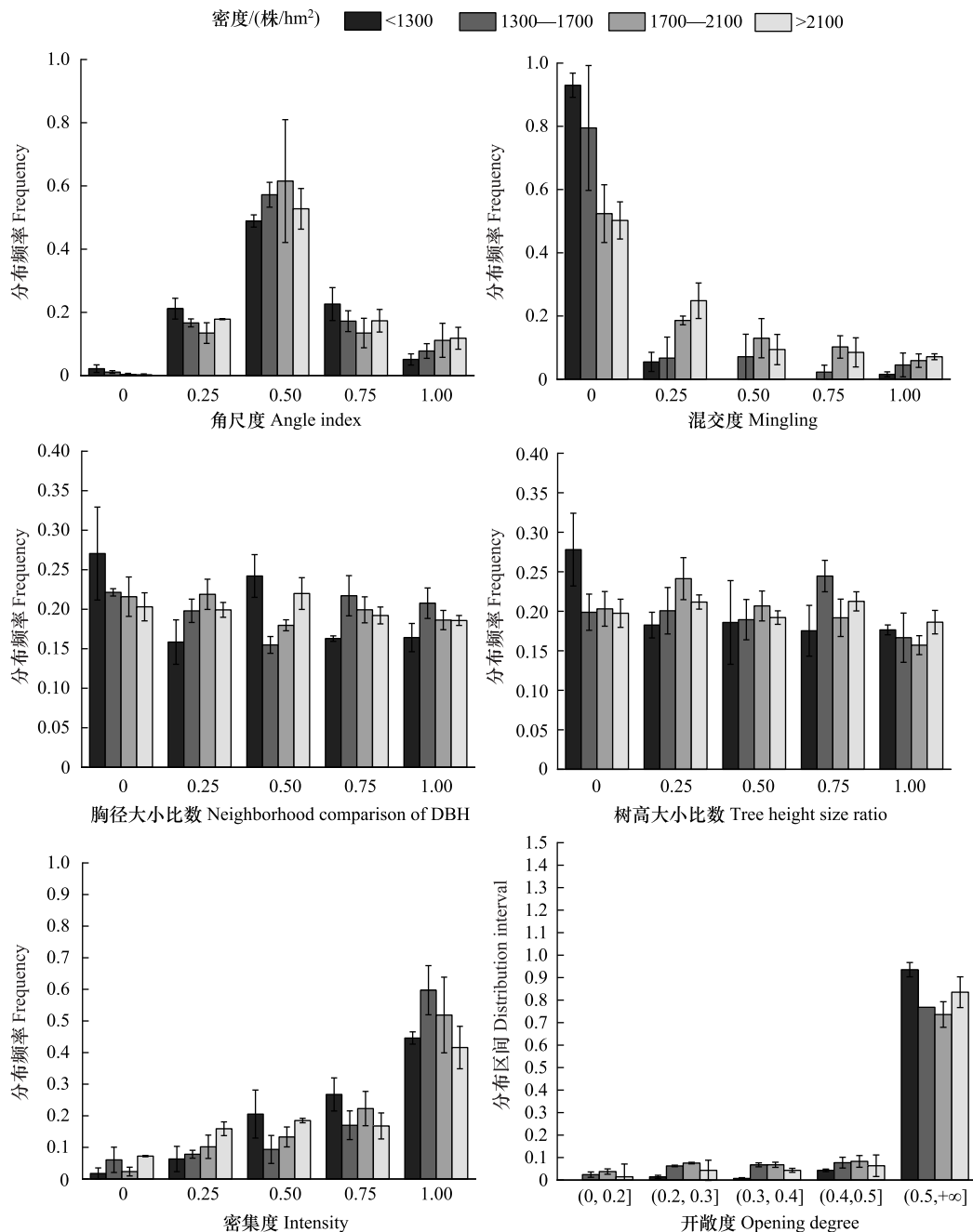


图 4 不同密度刺槐人工林的空间结构参数分布频率

Fig.4 Distribution frequency of spatial structure parameters of *Robinia pseudoacacia* plantations with different densities

混交度在各林分密度间差异明显。混交度取值为 0 的分布频率在各林分密度样地均为最大;随着林分密

度升高,其它混交度的分布频率均明显降低,这说明该地区刺槐林的乔木层树种多样性低。

胸径和树高的大小比数在本研究的刺槐林样地的平均值为 0.49,表明林木分化尚不明显,基本处于中庸状态。胸径和树高的大小比数的各等级分布频率均在 20%附近波动,呈均衡分布特征。

开敞度的分布频率表明,在林分密度<1300 株/hm²的样地,透光很充足和充足的林木株数占比达到 90%,透光性最好;在密度>2100 株/hm²的样地,透光空间严重不足和不足的林木接近 50%;当林分密度<1300 株/hm²时开敞度最佳。

密集度在各密度样地的情况表明,林内树冠孤立的林木($C=0$)分布频率在 10%以内,仅与 1 或 2 株相邻木树冠接触的林木($C=0.25$ 或 0.5)占比约为 15%,与 3 株相邻木树冠接触的林木($C=0.75$)不超过 30%,有 40%以上的林木与周围 4 株相邻木树冠都有接触($C=1$)且在 4 个密度样地中均是分布频率最大,表明林冠竞争相当激烈。

3.3 不同密度刺槐林空间结构参数与灌草多样性的关系

3.3.1 林分空间结构参数的 Person 相关性

图 5 是刺槐林空间结构参数和灌草多样性的 Person 相关分析结果。灌木层中,Pielou 均匀度指数和胸径大小比数、密集度显著负相关($P<0.05$);Simpson 指数、物种丰富度指数均与开敞度极显著正相关($P<0.01$),与 Gini 指数显著正相关($P<0.05$)。草本层中,物种丰富度指数、Gini 指数均与混交度显著正相关($P<0.05$),与胸径大小比数显著负相关($P<0.05$)。因此认为开敞度是影响林下灌木多样性的关键因子,混交度是影响林下草本多样性的关键因子。

3.3.2 灰色关联度分析

由表 4、表 5 可知,林分空间结构参数与林下灌草物种多样性联系密切,其关联度基本都在 0.5 以上,属中等关联度。根据各密度林分内空间结构参数对物种多样性影响的排序赋予不同权重值,排序 1、2、3、4 时分别为 0.4、0.3、0.2、0.1,然后计算权重之和^[16]。各密度刺槐林的灌草多样性指数与空间结构参数的关联系数不同,即不存在某一空间结构参数对林下灌草多样性起决定性作用的情况,而是受到多重空间结构参数的共同影响。

表 4 林分空间结构参数与灌木层物种多样性的灰色关联度及其排序

Table 4 Grey correlation degree and its ranking between spatial structure parameters of stand and species diversity of shrub layer

密度梯度 Ddensity gradient/ (株/hm ²)	林分空间 结构参数 Spatial structure parameters of stand	Gini 指数 Gini index		Simpson 指数 Simpson index		Shannon- Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		Patrick 指数 Patrick index		权重 Weight
		数值 Value	排序 Ranking	数值 Value	排序 Ranking	数值 Value	排序 Ranking	数值 Value	排序 Ranking	数值 Value	排序 Ranking	
<1300	<i>M</i>	0.612	3	0.648	1	0.643	3	0.664	1	0.596	1	1.014
	<i>U₂</i>	0.648	1	0.643	2	0.664	2	0.596	3	0.595	2	0.949
	<i>C</i>	0.648	1	0.643	2	0.664	2	0.596	3	0.595	2	0.949
	<i>K</i>	0.648	1	0.643	2	0.664	2	0.596	3	0.595	2	0.949
	<i>W</i>	0.645	2	0.640	3	0.661	1	0.594	3	0.593	3	0.824
	<i>U₁</i>	0.591	4	0.591	4	0.588	4	0.600	2	0.556	4	0.413
1300—1700	<i>K</i>	0.597	1	0.590	2	0.553	2	0.624	1	0.595	1	1.069
	<i>U₁</i>	0.580	2	0.603	1	0.560	1	0.562	2	0.581	2	0.982
	<i>W</i>	0.569	3	0.449	4	0.447	3	0.456	3	0.577	3	0.455
	<i>C</i>	0.569	3	0.449	4	0.447	3	0.456	3	0.577	3	0.455
	<i>M</i>	0.448	4	0.569	3	0.449	3	0.447	4	0.456	4	0.339
	<i>U₂</i>	0.569	3	0.449	4	0.447	3	0.456	3	0.577	3	0.307
1700—2100	<i>U₁</i>	0.832	1	0.606	1	0.737	1	0.646	1	0.786	1	1.443
	<i>W</i>	0.467	3	0.519	2	0.526	2	0.454	3	0.491	2	0.645

续表

密度梯度 Ddensity gradient/ (株/hm ²)	林分空间 结构参数 Spatial structure parameters of stand	Gini 指数 Gini index		Simpson 指数 Simpson index		Shannon- Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		Patrick 指数 Patrick index		权重 Weight
		数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序	
		Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	
>2100	<i>U</i> ₂	0.467	3	0.519	2	0.526	2	0.454	3	0.491	2	0.645
	<i>C</i>	0.467	3	0.519	2	0.526	2	0.454	3	0.491	2	0.645
	<i>K</i>	0.467	3	0.519	2	0.526	2	0.454	3	0.491	2	0.645
	<i>M</i>	0.582	2	0.466	3	0.518	3	0.525	2	0.453	3	0.620
	<i>U</i> ₁	0.591	2	0.594	1	0.608	1	0.597	1	0.604	1	1.138
	<i>W</i>	0.594	1	0.571	2	0.492	3	0.548	2	0.508	2	0.824
	<i>U</i> ₂	0.594	1	0.571	2	0.492	3	0.548	2	0.508	2	0.824
	<i>C</i>	0.594	1	0.571	2	0.492	3	0.548	2	0.508	2	0.824
	<i>K</i>	0.594	1	0.571	2	0.492	3	0.548	2	0.508	2	0.824
	<i>M</i>	0.521	3	0.594	1	0.571	2	0.492	3	0.548	3	0.721

M:混交度 Mingling;*U*₂:树高大小比数 Tree height size ratio;*C*:密集度 Intensity;*K*:开敞度 Opening degree;*W*:角尺度 Angle index;*U*₁:胸径大小比数 Neighborhood comparison of DBH

表 5 林分空间结构参数与草本层物种多样性的灰色关联度及其排序

Table 5 Grey correlation degree and its ranking between spatial structure parameters of stand and species diversity of herb layer

密度梯度 Ddensity gradient/ (株/hm ²)	林分空间 结构参数 Spatial structure parameters of stand	Gini 指数 Gini index		Simpson 指数 Simpson index		Shannon- Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		Patrick 指数 Patrick index		权重 Weight
		数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序	数值	排序	
		Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	Value	Ranking	
<1300	<i>M</i>	0.595	4	0.609	1	0.609	1	0.598	3	0.664	1	0.812
	<i>U</i> ₂	0.609	1	0.609	1	0.598	3	0.664	1	0.595	3	
	<i>C</i>	0.609	1	0.609	1	0.598	3	0.664	1	0.595	3	0.748
	<i>K</i>	0.609	1	0.609	1	0.598	3	0.664	1	0.595	3	0.748
	<i>U</i> ₁	0.597	3	0.597	3	0.600	2	0.588	4	0.600	2	0.538
1300—1700	<i>W</i>	0.607	2	0.606	2	0.596	4	0.662	2	0.593	4	0.499
	<i>K</i>	0.626	1	0.593	1	0.570	1	0.583	1	0.481	3	0.795
	<i>U</i> ₁	0.582	2	0.571	2	0.560	2	0.570	2	0.596	1	0.749
	<i>M</i>	0.577	3	0.562	3	0.503	3	0.446	4	0.496	2	0.406
	<i>W</i>	0.562	4	0.503	4	0.446	4	0.496	3	0.475	4	0.242
	<i>U</i> ₂	0.562	4	0.503	4	0.446	4	0.496	3	0.475	4	0.242
	<i>C</i>	0.562	4	0.503	4	0.446	4	0.496	3	0.475	4	0.242
1700—2100	<i>U</i> ₁	0.709	1	0.793	1	0.715	1	0.724	1	0.766	1	1.199
	<i>M</i>	0.491	3	0.582	2	0.453	3	0.470	3	0.566	2	0.529
	<i>W</i>	0.582	2	0.454	3	0.470	2	0.567	2	0.467	3	0.495
	<i>U</i> ₂	0.582	2	0.454	3	0.470	2	0.567	2	0.467	3	0.495
	<i>C</i>	0.582	2	0.454	3	0.470	2	0.567	2	0.467	3	0.495
>2100	<i>K</i>	0.582	2	0.454	3	0.470	2	0.567	2	0.467	3	0.495
	<i>U</i> ₁	0.573	1	0.571	1	0.584	1	0.567	2	0.604	1	0.874
	<i>M</i>	0.508	2	0.505	2	0.492	3	0.571	1	0.476	3	0.573
	<i>W</i>	0.505	3	0.492	3	0.571	2	0.476	3	0.508	2	0.517
	<i>U</i> ₂	0.505	3	0.492	3	0.571	2	0.476	3	0.508	2	0.517
	<i>C</i>	0.505	3	0.492	3	0.571	2	0.476	3	0.508	2	0.517
	<i>K</i>	0.505	3	0.492	3	0.571	2	0.476	3	0.508	2	0.517

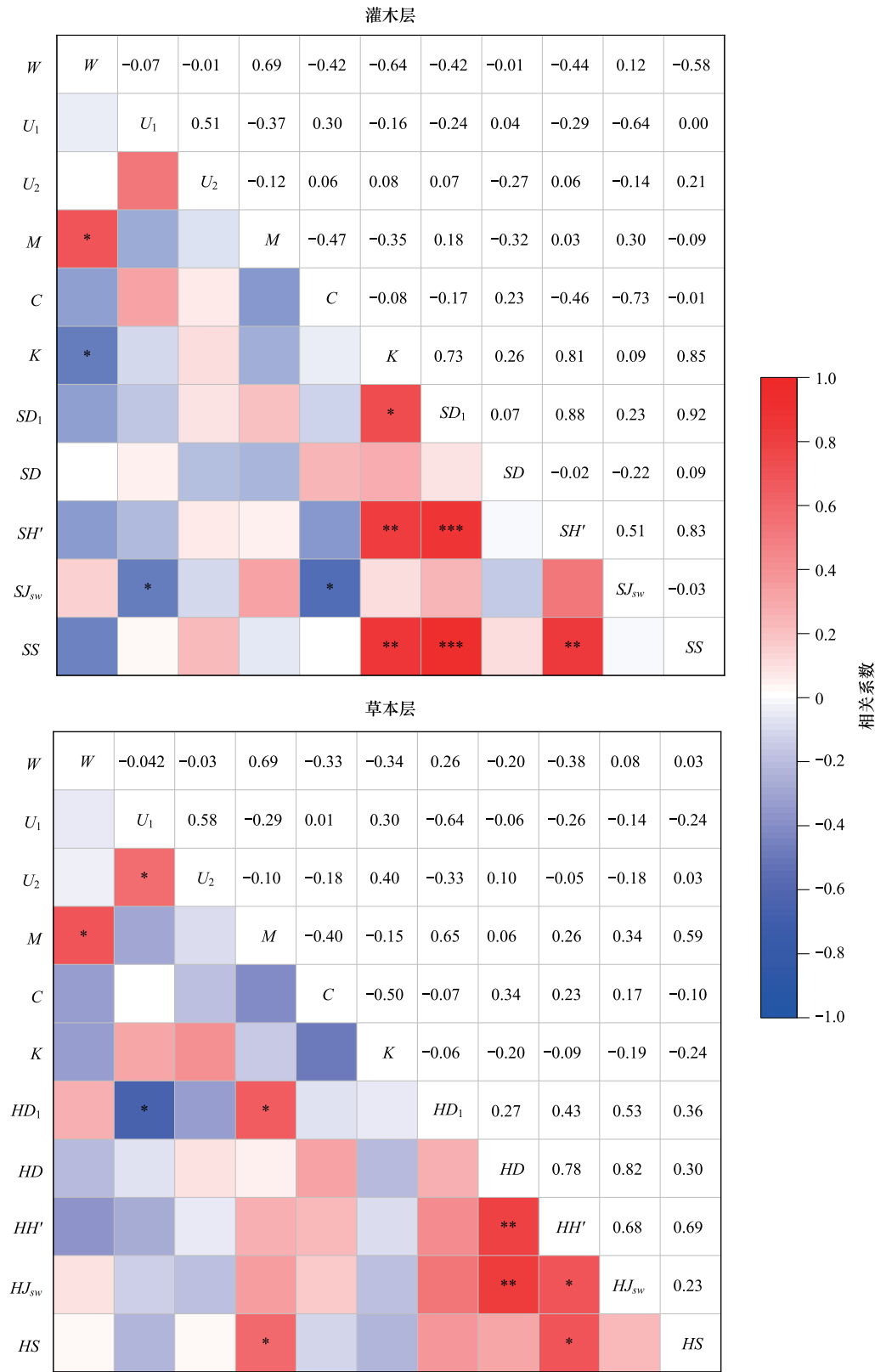


图 5 林分空间结构参数和灌草多样性指数的 Person 相关分析结果

Fig.5 Person correlation analysis results of stand spatial structure parameters and shrub diversity index

① **、* 表示显著水平 $P<0.01$ 、 $P<0.05$; ②多样性指数符号前的 *S*、*H* 表明为灌木、草本, 其中 *D₁*: Gini 指数 Gini index; *D*: Simpson 指数 Simpson index; *H'*: Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; *J_{SW}*: Pielou 指数 Pielou index; *S*: Patrick 指数 Patrick index; 如 *SD* 为灌木层 Simpson 指数 Simpson index; *W*: 角尺度 Angle index; *M*: 混交度 Mingling; *U₁*: 胸径大小比数 Neighborhood comparison of DBH; *U₂*: 树高大小比数 Tree height size ratio; *K*: 开敞度 Opening degree; *C*: 密集度 Intensity

当林分密度 <1300 株/ hm^2 时,林分混交度与草本层 Simpson 指数、Pielou 均匀度指数和 Patrick 指数关联度最高,对灌木层 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Patrick 指数影响最大;当林分密度在 $1300\text{—}1700$ 株/ hm^2 时,开敞度对林下植物多样性产生最主要影响,与草本层 Gini 指数关联度最高,对灌木层 Pielou 均匀度指数影响最大;当林分密度 >1700 株/ hm^2 时,胸径大小比数成为影响林下灌草多样性最主要的因子。

总的来看,当林分密度 <1300 、 $1300\text{—}1700$ 、 >1700 株/ hm^2 时,影响林下灌草多样性的主要因子分别是混交度、开敞度、胸径大小比数。

4 讨论

4.1 林分密度对林下植物组成及多样性的影响

刺槐是本研究中人工林群落的建群种和绝对优势种,不同密度刺槐林的林下植物种类数量及组成存在差异,表现为林下灌木草本的物种数随林分密度增加呈先增后减的变化趋势。林下植物生长受光照、水分、热量等条件影响,林分密度是影响林分质量的主要因素^[23],导致林下灌木和草本层的物种数量和组成显著不同。在低密度刺槐林中,喜光物种占据主导地位;而在高密度林分中,灌木和草本群落在组成上向耐荫和耐旱物种转移,这表明植物群落结构对林分密度的响应有显著的生态学意义。

在实地调查中,林下植物并没有明显的层次区别。在植物不分层的情况下,低密度林分中,草本植物如马唐占据主导地位;随着密度增加,木本植物如茅莓、臭椿的重要值排序逐渐提前,丰富了植物多样性。从增加林下植物覆盖度从而提升水土保持功能的角度来看,灌木层中刺槐、君迁子等物种的增多利于增强土壤保持和水源涵养能力,而在林分密度较高时作为草本层中木本植物的茅莓的重要值提前利于提升其水土保持作用。

林分密度变化不仅影响林下植物多样性,而且引起林下植物群落组成的明显变化^[24]。在林分密度 <1300 株/ hm^2 时,郁闭度较小(0.67),林下光照相对充足,灌草生长所需的光照、湿度等条件较好,林地的光照、水分、养分条件空间变异较大,丰富多样的林下生境利于不同习性的物种生存,林下植物物种会扩张其实际生态位,此时种类较丰富。当林分密度增加到 $1300\text{—}1700$ 株/ hm^2 时,林冠结构逐渐复杂,郁闭度提升到 0.70,进一步改善了林下小气候,此时的林下环境能使阳性和耐阴植物都能生长,从而林下物种多样性最丰富,这与王彦辉^[25]的研究结果一致:为了维持较高的林下物种数,应保持适当树木密度,其对应的最佳郁闭度在 0.7 左右。此外,林下植物发育良好,使其盖度和生物量都较大。当林分密度继续增大到 $1700\text{—}2100$ 株/ hm^2 ,冠层郁闭度(0.74)与林下光照条件密切相关^[26],光照成为影响林下植物生长的主导因子,此外,由于刺槐根系较深、耗水量较高,高密度林分的水分竞争加剧会降低土壤水分有效性,从而导致林下植物种数减少^[27]。当林分密度 >2100 株/ hm^2 时,林下灌草植物种总数应继续减少,但观测值却有所回升,原因可能在于样地立地质量较差使树木个体较小,也可能与乔木层林木剧烈竞争导致部分树木死亡造成郁闭度降低(0.68)有关,这与王依瑞等^[8]在官山林场的研究结果一致:当林冠郁闭度超过 0.45—0.6 这个阈值会引起林下植物生长特征中的多数指标快速降低。

本研究中林分密度对林下灌草多样性产生了重要影响,虽然未达显著差异水平。原因可能是多方面的,一是所选样地的林分密度范围较靠近并且郁闭度较为接近,未能超过引起林下植物多样性变化的阈值^[8];二是林下灌木层一旦形成,可以持续生长很多年,从而对环境变化不敏感^[24];三是研究林分源于人工植苗造林,且坡向、坡位、海拔等立地条件相对一致,导致各密度林分的灌草层物种数量和种类组成差别较小。

从追求植物(尤其林下植物)多样性角度来看,将研究立地的刺槐中龄人工林密度设置在 $1300\text{—}1700$ 株/ hm^2 时(对应林冠郁闭度 0.70),林下植物的物种总数及多样性均可维持在较高水平,草本层的多样性指数及灌木层的 Gini 指数和 Simpson 指数都达到了最大值。这与 Zhao 等^[24]在陕北西部黄土丘陵沟壑区的研究结论相似:在 $1000\text{—}1500$ 株/ hm^2 的林分密度下,刺槐中龄人工林生态系统的多功能指数最高;也与云慧雅等^[28]研究确定的晋西黄土区不同类型和密度林分的林下灌草多样性最高所要求的林分密度($1200\text{—}1600$

株/hm²)基本一致。有两个原因可以解释这一结论:(1)当林分密度较低(<1300 株/hm²)时,开敞度变大会增加到到达森林地面的光照量,地面温度上升导致土壤水分加速蒸发,凋落物分解速度加快可能会加速土壤养分流失,从而抑制林下植被生长^[29]。(2)中等密度林分(1300—1700 株/hm²)会提高水分利用的有效性,支持更多林下植物种类生存,这将导致林下植被凋落物增加,促进土壤养分输入,形成正向反馈^[30]。因此,在陇东黄土高原残塬立地及相近立地上经营早期退耕还林工程的刺槐中龄人工林时,建议选择最适密度 1300—1700 株/hm²,在此指标区间对原有林分进行补植或疏伐,以将林分密度控制在最适密度区间范围内,这可促进和维持较好的林下植物生长发育,提高人工林的稳定性和多功能性。

4.2 林分密度对刺槐人工林林分空间结构的影响

本研究采用空间结构参数的均值及分布频率定量描述了刺槐人工林空间结构参数的平均状态和多样性,显示所研究刺槐人工林整体呈聚集分布、混交性较差、多样性较低、竞争势均处于较强状态。

刺槐林样地中仅有少量自然更新的树种(如君迁子、臭椿等),其乔木层组成单一,混交性差,林分整体处于中等密集至很密集程度。林木的平均角尺度在低密度林分时为 0.419,随密度加大升高到 0.55 左右,表明刺槐林木空间分布格局随密度增大由均匀分布逐渐向随机分布发展^[31],当密度为 1700—2100 株/hm²时,57%的林木呈随机分布,此时林木分布格局最接近天然状态^[32]。本研究中四个梯度密度刺槐林样地均有 40%以上的单木处于很密集状态,随着林分密度变化,林分的密集度和树冠冠幅也随之波动^[33],林分密度增加加剧了林木竞争,密集度也随之增加,而当密度过高(>2100 株/hm²)时强烈竞争使林分自疏发生,树冠水平生长空间严重受限,原先长势良好的树木可能因进一步向上生长以获取优质光照资源,而弱势林木受到挤压,从而形成了复层林,改变了冠层结构并使得密集度降低。整体而言,该地区刺槐林内树冠连接很紧密,这种过度拥挤可能会导致树体损伤,可通过围绕目标树的结构化经营对林木合理疏伐,调整林分密度,优化林分结构,扩大林木平均生长空间。不同密度等级林分样地的大小分化程度较为接近,各密度刺槐林的胸径和树高的大小比数均值均为 0.49,表明该地区林木生长整体处于亚优势状态,具有良好的径级结构特征。虽然胸径和树高的大小比数的等级分布略有差异,但大部分分布在 15%—30%区间内。林分密度在<1300 株/hm²时,林内透光条件很充足和充足的占比达到 90%,透光性最好;随着林分密度增加,乔木生长空间处于严重不足和不足状态,需通过间伐干扰树来缓解刺槐竞争压力,以利于保留木的健康发育。

4.3 刺槐林空间结构参数与林下灌草多样性的相关性

根据 Person 相关性分析,混交度与林下草本层的物种丰富度指数和 Gini 多样性指数都有很强相关性($P<0.05$)。林下植物的物种丰富度和多样性会随混交度增大而增加,一方面,混交度对林下植物多样性的影响表现为促进乔木间的竞争,不同长度的根系在土壤中纵横交错,导致林下植物相互抑制,从而为林下灌草生长释放养分空间^[34];另一方面,混交度增加可促进形成复杂的林分垂直结构,丰富的异质性微生境能为更多林下植物提供生存空间,从而容纳更多物种生存^[35]。开敞度和灌木层 Simpson 指数、物种丰富度指数呈极显著正相关($P<0.01$),可能是因上层林木对林分透光性和物种生态位有明显影响^[36];林下植物对光斑分布十分敏感,开敞度影响林分透光性从而是决定林下植物生长的重要因素,然而开敞度与林下草本植物物种多样性指数无显著相关性($P>0.05$),这与 Cui 等^[34]的研究结果一致。其中,开敞度对灌木多样性的影响要大于草本层,可能因灌木层位于比草本层更优先接受林隙光照的植物层,可一定程度上解释开敞度与灌木层物种多样性联系更紧密的原因;然而这与吕康婷等^[37]和张亚昊等^[38]研究认为的林分垂直空间结构因子林层指数、开敞度对林下草本和灌木植物多样性的影响程度最小的结果不一致,可能是由于本研究中各样地的林冠郁闭度均较高、开敞度均处于较低范围。

灰色关联度分析显示,主导林下植被多样性的空间结构参数随林分密度而变化,表明密度通过影响林分空间结构而间接影响林下植物多样性。影响林下灌草多样性的主要因子,在林分密度<1300 株/hm²时是混交度,在 1300—1700 株/hm²时是开敞度,这与 Person 相关分析结果一致,这说明混交度和开敞度是影响林下灌草多样性的关键因素。当林分密度>1700 株/hm²时,胸径大小比数对林下植物多样性的影响最大,这是由于

大小比数体现了目标树受侧方树木挤压和上方树木遮盖,这时大小比数严重影响到树冠填充和光截留,并会严重影响林下植物的光照,从而造成生态位差异,影响林下植物多样性^[39]。

因此,为了促进林分空间结构优化和提高林下植物多样性,一方面要围绕目标树间伐干扰木来调节林分密度;另一方面要引导纯林向混交林方向发展,促进提高乔木层的物种多样性;还要增加林分的开敞度,改善透光条件。未来的研究应注重对比混交林与人工林的差异,加大密度梯度,建立林分密度与灌草多样性和林分空间结构参数之间的结构模型,进一步阐明在不同林分密度时的林下灌草多样性受林分空间结构影响的内在机理。

5 结论

在陇东黄土高原沟壑区的残塬立地上,对“退耕还林”早期栽植在退耕梯田上的刺槐中龄人工林的研究表明,林分密度的不同导致了林分空间结构特征差异,影响了林下灌草多样性。在林分空间结构参数中,开敞度能更好地解释了灌木层多样性指数变化,混交度能更好解释草本层多样性指数变化。影响林下灌草多样性的主要因子,在林分密度 <1300 株/ hm^2 时为林分混交度,1300—1700 株/ hm^2 时为开敞度, >1700 株/ hm^2 时为胸径大小比数。在本研究的立地和林龄条件下,适宜林下植物多样性保护的最优密度为1300—1700 株/ hm^2 ,这时林下植物种总数和草本层多样性指数均优于其它密度,且刺槐林分布格局最接近天然状态,可以此来指导退耕还林工程早期栽植的刺槐中龄人工林的经营管理和结构优化,通过合理疏伐干扰木来改善透光条件,并引导刺槐纯林向混交林转变从而增加混交度,从而促进林下灌草层发育和提高林下植物的多样性。

参考文献 (References):

- [1] Wang X, Zhang K M, Li J, Li Q, Na W J, Gao Y K, Gao Z Y. Response of soil water in deep dry soil layers to monthly precipitation, plant species, and surface mulch in a semi-arid hilly loess region of China. *Agricultural Water Management*, 2024, 291: 108612.
- [2] Wen X, Zhen L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: a systematic review. *Environmental Development*, 2020, 34: 100493.
- [3] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [4] 王思淇, 张建军, 张彦勤, 赵炯昌, 胡亚伟, 李阳, 唐鹏, 卫朝阳. 晋西黄土区不同密度刺槐林下植物群落物种多样性. *干旱区研究*, 2023, 40(7): 1141-1151.
- [5] Zhang Y X, Liu T R, Guo J P, Tan Z J, Dong W, Wang H H. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 28: e01628.
- [6] 邓婷婷, 魏岩, 任思远, 祝燕. 北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响. *生物多样性*, 2023, 31(7): 14-25.
- [7] 李江文, 何邦印, 李彩, 回虹燕, 刘博, 张晓曦. 不同林龄刺槐林下植物群落物种组成及功能多样性差异分析. *植物科学学报*, 2022, 40(3): 315-323.
- [8] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 李平平, 于澎涛, 甄理, 李志鑫, 尚会军. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 305-314.
- [9] Wu L C, Liu J, Takashima A, Ishigaki K, Watanabe S. Effect of selective logging on stand structure and tree species diversity in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Annals of Forest Science*, 2013, 70(5): 535-543.
- [10] 逯金鑫, 高飞, 周荣磊, 刘洋洋, 温仲明. 不同植被类型下草本群落与土壤因子的关系. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 310-317, 326.
- [11] 李转桃, 徐英先, 赵鹏, 罗永忠. 海拔对祁连山东段青海云杉林林下灌草多样性的影响. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(6): 59-66.
- [12] 车畅, 叶尔江·拜克吐尔汉, 唐努尔·叶尔肯, 王强, 魏立志. 天山云杉林林下草本多样性随地理因子变化规律. *东北林业大学学报*, 2023, 51(12): 30-36.
- [13] 崔成乘, 查同刚, 张晓霞, 陈瑜佳, 高连炜, 白凌然, 马子澳, 于洋. 北京通州平原生态林空间结构特征. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2088-2096.
- [14] Kreutz A, Aakala T, Grenfell R, Kuuluvainen T. Spatial tree community structure in three stands across a forest succession gradient in northern boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2015, 49(2): 1-17.
- [15] Duchateau E, Schneider R, Tremblay S, Dupont-Leduc L, Pretzsch H. Modelling the spatial structure of white spruce plantations and their changes

- after various thinning treatments. *Forests*, 2021, 12(6): 740-758.
- [16] 马刘乐, 张梦孜. 不同干扰强度下林分空间结构对灌草层物种多样性的影响. *西北林学院学报*, 2023, 38(3): 63-69.
- [17] 向钦, 郭秋菊, 艾训儒, 姚兰, 朱江, 薛卫星, 周云, 赵免敦, 吴举扬. 林分空间结构与物种多样性随空间尺度变化的规律研究. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 151-160.
- [18] 李志娟, 李素清. 山西黎城野生萱草群落特征及稳定性. *生态学杂志*, 2024, 43(7): 2083-2092.
- [19] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 张岗岗, 张弓乔, 程世平, 卢彦磊. 基于 4 株相邻木关系的林分空间结构多样性测度方法研究. *北京林业大学学报*, 2023, 45(7): 18-26.
- [20] 刘亚栋, 王晓霞, 和璐璐, 柳正元, 曾小莉, 沙海峰, 何宝华, 金莹杉, 李杰, 陈建梅, 郭桂凤, 段劫. 北京地区油松人工林不同演替类型空间结构对林下植被及土壤的影响. *生态学报*, 2023, 43(5): 1959-1970.
- [21] 张佳旺, 董希斌, 郭奔, 刘慧, 张莹, 任允泽, 滕弛, 宋梓恺, 张雨晨. 天然落叶松林不同演替阶段空间结构参数的多元分布. *东北林业大学学报*, 2024, 52(3): 1-9.
- [22] 殷东生, 沈海龙. 森林植物耐荫性及其形态和生理适应性研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2687-2698.
- [23] Wei X, Liang W J. Regulation of stand density alters forest structure and soil moisture during afforestation with *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr. On the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2021, 491: 119196.
- [24] Zhao M, Liu S H, Sun Y R, Chen Y M. Does stand density affect understory vegetation and soil properties of differently aged *Robinia pseudoacacia* plantations? *Forest Ecology and Management*, 2023, 548: 121444.
- [25] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, Liu Y H, Bohnett E, Zhang K B. Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber production and understory plant diversity: a case-study of a larch plantation in Northwest China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(9): 2998-3008.
- [26] Wilson D S, Puettmann K J. Density management and biodiversity in young Douglas-fir forests: challenges of managing across scales. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246(1): 123-134.
- [27] Vítková M, Müllerová J, Sádlo J, Pergl J, Pyšek P. Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: a story of an invasive tree in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2017, 384: 287-302.
- [28] 云慧雅, 毕华兴, 焦振寰, 王宁, 崔艳红, 赵丹阳, 王珊珊, 兰道云, 刘泽晖. 晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(3): 569-578.
- [29] Reyer C P O, Bathgate S, Blennow K, Borges J G, Bugmann H, Delzon S, Faias S P, Garcia-Gonzalo J, Gardiner B, Gonzalez-Olabarria J R, Gracia C, Hernández J G, Kellomäki S, Kramer K, Lexer M J, Lindner M, van der Maaten E, Maroschek M, Muys B, Nicoll B, Palahi M, Palma J H, Paulo J A, Peltola H, Pukkala T, Rammer W, Ray D, Sabaté S, Schelhaas M J, Seidl R, Temperli C, Tomé M, Yousefpour R, Zimmermann N E, Hanewinkel M. Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests? *Environmental Research Letters*; ERL [Web Site], 2017, 12(3): 034027.
- [30] Tague C L, Moritz M, Hanan E. The changing water cycle: the eco-hydrologic impacts of forest density reduction in Mediterranean (seasonally dry) regions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2019, 6(4): e1350.
- [31] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 党普兴. 林木空间分布格局分析方法. *生态学报*, 2007, 27(11): 4717-4728.
- [32] Zhang G Q, Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, Wang H X, Liu W Z, Zang R G. Composition of basal area in natural forests based on the uniform angle index. *Ecological Informatics*, 2018, 45: 1-8.
- [33] 蒋孟多, 马映栋, 蒋睿, 李平英, 包永平. 不同密度下小陇山蒙古栎次生混交林树冠结构与密集度的关系. *林业科学研究*, 2024, 37(1): 110-118.
- [34] Cui R R, Qi S, Wu B C, Zhang D, Zhang L, Zhou P, Ma N, Huang X. The influence of stand structure on understory herbaceous plants species diversity of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing, China. *Forests*, 2022, 13(11): 1921-1934.
- [35] 朱光玉, 徐奇刚, 吕勇. 湖南栎类天然次生林林分空间结构对灌木物种多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5404-5412.
- [36] 欧芷阳, 庞世龙, 谭长强, 郑威, 何琴飞, 申文辉. 林分结构对桂西南蚬木种群天然更新的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3181-3188.
- [37] 吕康婷, 张二山, 李思颖, 靳姗姗, 周梦丽, 闫东锋. 黄山松人工林林分空间结构对林下植物多样性的影响. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(6): 1257-1266.
- [38] 张亚昊, 佃袁勇, 黄光体, 刘晓阳, 韩泽民, 菅永峰, 李源, 王熊. 不同演替阶段马尾松林林分空间结构对物种多样性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2357-2365.
- [39] Forrester D I, Pretzsch H. Tamm Review: on the strength of evidence when comparing ecosystem functions of mixtures with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 2015, 356: 41-53.